

不同车型超高车辆撞击桥梁上部结构荷载计算*

张炎圣 何水涛 陆新征 卢啸

(清华大学土木工程系, 清华大学结构工程与振动教育部重点实验室 北京 100084)

摘要: 目前超高车辆撞击桥梁上部结构已成为我国桥梁结构安全的一个重要威胁。为加以合理设计与防护, 需要了解撞击荷载的大小和计算方法, 而目前我国在该领域研究尚很不足。本文在精细化有限元模型的基础上, 提出了撞击荷载计算的简化模型, 并对厢式车、自卸车和罐车等不同车辆的撞击荷载进行了计算与比较。

关键词: 撞击; 荷载计算; 桥梁上部结构; 超高车辆类型; 精细化有限元; 简化模型

1 概述

近年, 超高车辆撞击桥梁上部结构的事故频繁发生, 严重威胁城市交通安全与正常运行。仅以北京为例, 50%的桥梁上部结构曾遭超高车辆撞击, 由此损坏的桥梁占已损坏桥梁总数的 20%以上^[1]。为减小超高车辆撞击对桥梁上部结构的损坏, 需要了解撞击荷载的大小和计算方法, 从而为桥梁上部结构抗撞设计与防撞装置设计提供依据。

由于超高车辆-桥梁上部结构碰撞问题非常复杂, 研究难度较大, 我国目前在该领域尚无系统研究。本文在陆新征等^[2-5]提出的超高车辆-桥梁上部结构碰撞精细化有限元模型的基础上, 对厢式车、自卸车和罐车三种典型车型的撞击进行了模拟, 并提出了荷载计算简化模型, 可供工程设计参考。

2 超高车辆类型

事故资料表明, 超高车辆撞击事故包括两类, 一是车上货物超高导致撞击; 二是车体本身超高导致撞击, 其中尤其以重型自卸卡车货斗意外翻起导致撞击为多。因此, 本文重点研究车辆自身超高撞击问题。以重型自卸车(东风 3208 自卸车)为原型^[6], 同时为比较不同车型撞击的差异, 还模拟了中型厢式车(东风 145 厢式货车)^[6]和中型罐车(东风 EQ140 水泥罐车)^[6]的撞击。其中, 中型厢式车和中型罐车设为满载, 重型自卸车设为空载, 这是考虑到自卸车撞击多是因货斗意外翻起, 此时货斗往往没有载货, 而且如此设置可保证上述三种车型总重大致相等(均约为 10t), 从而便于研究车厢结构形式对撞击荷载的影响。

3 有限元模型与计算

3.1 有限元模型

采用文献[2]建议的简支钢箱-混凝土板组合梁桥有限元模型, 跨度为 30m, 宽度为 6.4m。矩形钢箱梁高 900mm, 宽 1600mm, 底部钢板厚 20mm, 两侧腹板厚 18mm。混凝土面板厚 200mm, 其纵向和横向配筋率分别为 1%和 2%。

对于车辆, 根据文献和图纸建立车厢的精细化模型^[7-9]。车厢属于薄壁构件, 采用厚壳单元建模。三种车厢的材料均为优质耐候高强钢(COR-TEN A), 采用考虑屈服、强化以及率效应的 Cowper-Symonds 钢材本构^[10], 参数如表 1 所示。除了车厢, 其余部件进行适当简化。底盘和驾驶室分别简化为纵梁-横梁框架和封闭箱体, 采用厚壳单元建模, 材料设为线弹性。车轮采用实体单元建模, 材料设为线弹性, 根据实际车轮压缩刚度确定弹性模量取值^[11]。车辆装备质量根据实际情况分布于车

*基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 50808106)

厢、底盘和驾驶室, 采取对车厢赋予附加密度的方法考虑货物对质量和转动惯量的影响。三种车型的有限元模型如图 1~3 所示。

表 1 Cowper-Symonds 钢材本构参数

σ_0/MPa	E/MPa	E_t/MPa	β	C	p
500	2×10^5	1×10^3	1	40	5

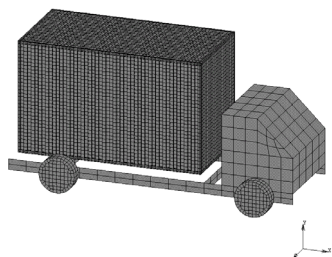


图 1 厢式车有限元模型

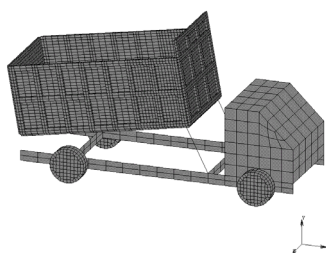


图 2 自卸车有限元模型

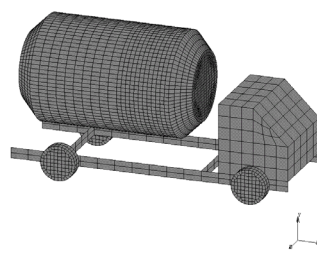


图 3 罐车有限元模型

3.2 边界条件简化

虽然精细化有限元模型可考虑各种复杂边界条件, 但为后面提出撞击荷载工程计算方法, 需要简化部分边界条件。本文提出的边界条件简化包括: (1) 忽略车厢-桥梁摩擦力; (2) 忽略车轮-路面摩擦力; (3) 忽略车辆重力; (4) 桥梁简化成刚性墙。对罐车计算表 2 所示工况 1~4, 以检验上述边界条件简化。其中, 车厢-桥梁摩擦系数按钢材-钢材接触考虑, 取为 $0.1^{[12]}$, 工况 2 中车轮-路面摩擦系数取为 $0.5^{[13]}$ 。所有工况桥下净空为 3.5m, 三种车型的撞击高度接近相等, 约为 3.75m。

表 2 边界条件简化检验计算工况

工况编号	碰撞物	车厢-桥梁摩擦	车轮-路面摩擦	是否考虑车辆	撞击速度 /(km/h)
		系数	系数	重力	
1	罐车-桥梁	0.1	0	否	60
2	罐车-桥梁	0.1	0.5	否	60
3	罐车-桥梁	0.1	0	是	60
4	罐车-刚性墙	0.1	0	否	60

工况 1 水平和垂直方向的法向力与摩擦力对比如图 4, 5 所示; 对比工况 1 与工况 2 计算结果, 车轮-路面摩擦力对水平撞击力和垂直撞击力的影响如图 6, 7 所示; 对比工况 1 与 3 工况计算结果, 车辆重力对水平撞击力和垂直撞击力的影响如图 8, 9 所示; 对比工况 1 与 4 工况计算结果, 将桥梁简化成刚性墙对水平撞击力和垂直撞击力的影响如图 10, 11 所示。可见上述边界条件简化产生的撞击荷载计算误差很小。另外, 桥梁可简化成刚性墙, 是因为桥梁上部结构质量和刚度一般远大于车辆质量和刚度。本文桥梁为单跨双车道钢箱-混凝土板组合梁桥, 结构形式轻巧, 相对而言, 混凝土梁桥质量和刚度更大, 且一般立交桥跨度多于 1 跨, 宽度多于 2 车道, 因此计算撞击荷载时, 刚性墙简化对于立交桥基本合理。

3.3 不同车型撞击荷载比较

撞击荷载对桥梁上部结构的破坏包括两类: (1) 瞬时撞击力引起碰撞区域局部破坏, 例如碰撞区域混凝土开裂或钢材屈服; (2) 撞击冲量引起结构整体位移响应, 从而导致落梁、弯曲或扭转破坏。

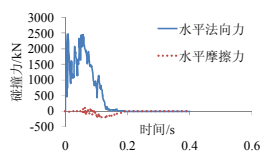


图4 水平法向力与摩擦力比较(工况1)

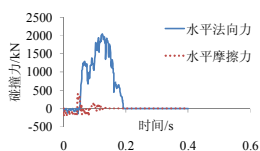


图5 竖直法向力与摩擦力比较(工况1)

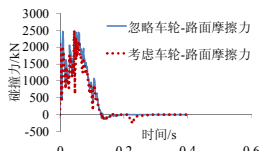


图6 忽略车轮-路面摩擦力对水平力影响

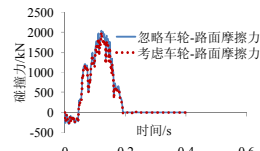


图7 忽略车轮-路面摩擦力对竖直力影响

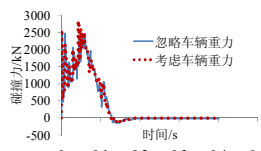


图8 忽略车辆重力对水平力影响

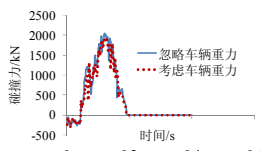


图9 忽略车辆重力对竖直力影响

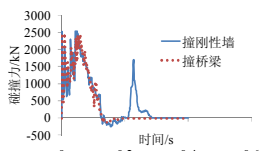


图10 桥梁简化成刚性墙对水平力影响

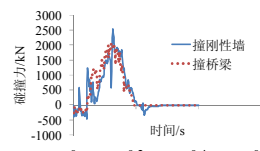


图11 桥梁简化成刚性墙对竖直力影响

因此对于撞击荷载,要从局部破坏撞击力和撞击冲量两个方面进行分析。局部破坏撞击力确定方法比较复杂,文献[14]取0.1s时间范围内的平均撞击力作为局部破坏撞击力。参考文献[14],本文采取如下方法确定局部破坏撞击力:首先确定碰撞力时程峰值对应的时间 t_p ,如果该时间小于0.05s,则取0~0.1s时间范围内的平均碰撞力,如果该时间大于0.05s,则取 $(t_p-0.05s)~(t_p+0.05s)$ 时间范围内的平均碰撞力。

以重型自卸车为例,不同速度工况撞击力时程如图12,13所示。无论哪种车型,撞击荷载既有水平力,也有竖直力,且两个力的大小在同一量级。随着撞击速度的增大,局部破坏撞击力和撞击冲量逐渐增大。

以60km/h速度工况为例,不同车型局部破坏撞击力和撞击冲量比较如图14,15所示。可见:

- (1) 水平方向局部破坏撞击力按厢式车-自卸车-罐车的顺序增大,自卸车和罐车比较接近;
- (2) 竖直方向局部破坏撞击力则是自卸车最大,罐车其次,厢式车最小;
- (3) 水平撞击冲量按厢式车-自卸车-罐车的顺序增大,自卸车和罐车比较接近;
- (4) 竖直撞击冲量则相反,按厢式车-自卸车-罐车的顺序减小。

厢式车车厢刚度和强度往往较小,如本文厢式车,车厢框架由3mm厚薄壁梁构成,蒙皮为2mm厚波纹板,因此撞击时车厢容易屈服,撞击力较小。而本文的自卸车,车厢板厚5mm,且多处设有6mm厚钢板卷成的加劲筋,本文的罐车,车厢端部板厚10mm,中部板厚8mm,因此自卸车和罐车的撞击力都较大。

进行桥梁上部结构抗撞设计,应根据其所处地区交通状况确定车速,并从上述三种车型中选取最不利撞击荷载作为设计依据。由于厢式车的撞击荷载相对较小,本文后续讨论主要针对自卸车和罐车。

4 简化模型与应用

根据上文讨论,建立超高车辆-桥梁上部结构碰撞荷载计算简化模型如图16所示,超高车辆运动坐标系和受力情况如图17所示。

精细化有限元计算结果表明,超高车辆位移响应包括水平和竖直方向刚体平动,以及绕后车轴刚体转动^[2-5],因此将超高车辆质量集中到后车轴,并赋予转动惯量和刚臂,如图16所示。运动坐标系包括三个自由度 (x, y, θ) ,原点选在后车轴初始位置,如图17所示。图16中, H 为碰撞区域到后车轴的竖直距离, L 为碰撞区域到后车轴的水平距离, J 为车辆绕后车轴的转动惯量, m 为车辆的质量, V 为车辆的初始速度。

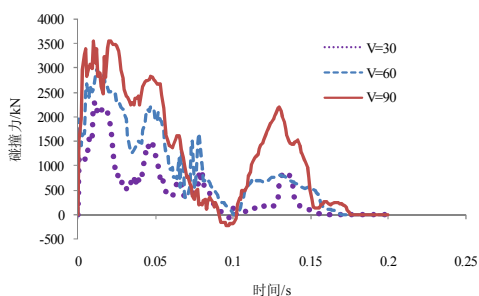


图 12 自卸车水平撞击力历程

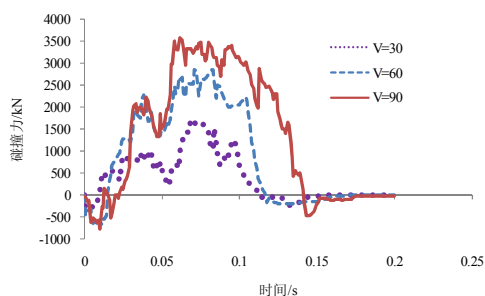


图 13 自卸车竖直撞击力历程

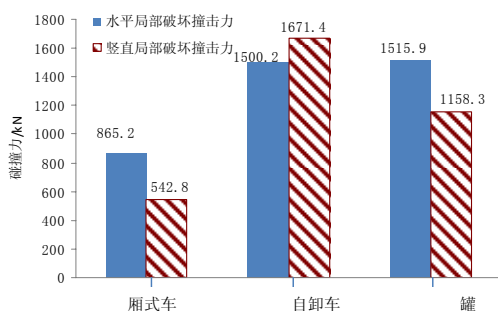


图 14 局部破坏冲击力车型比较 ($V=60\text{km/h}$)

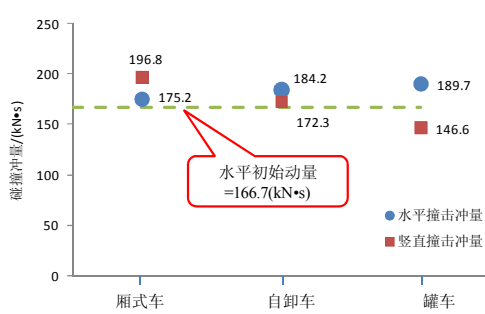


图 15 冲击冲量车型比较 ($V=60\text{km/h}$)

精细化有限元计算结果表明,碰撞区域车厢塑性变形明显^[2-5],这是由水平撞击力 F_x 和竖直撞击力 F_y 引起(图 17)。简化模型用理想弹塑性弹簧对此予以考虑(图 16),其中 k_x 和 k_y 为水平弹簧和竖直弹簧压缩刚度(拉伸时值为 0), F_{px} 和 F_{py} 为水平弹簧和竖直弹簧屈服力。路面对超高车辆的支持力 F_w (图 17)用竖直弹簧模拟(图 16), k_w 为车轮的压缩刚度(拉伸时值为 0)

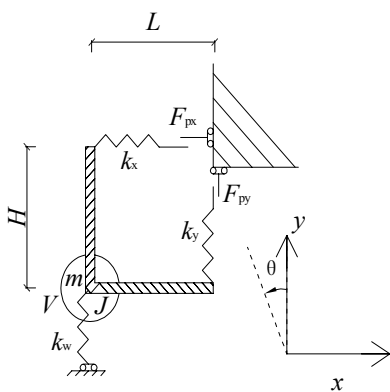


图 16 简化模型

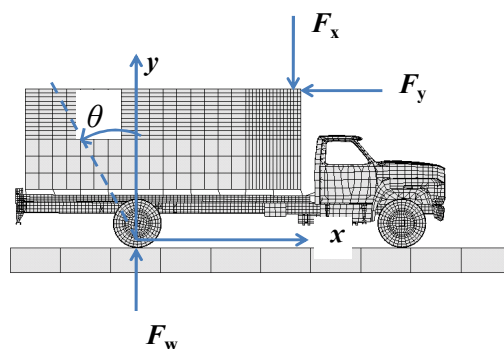


图 17 运动坐标系和受力示意图

根据图 16, 17, 建立计算公式(1)~(4)。公式(1)~(4)中, $x-H\sin\theta$ 为水平弹簧总变形量, dp_x 为水平弹簧累积塑性变形量, $y+L\sin\theta$ 为竖直弹簧总变形量, dp_y 为竖直弹簧累积塑性变形量,其它参数物理意义见图 16, 17。

简化模型参数可分成两类:一类根据车型及其载货情况容易确定,包括质量 m 、转动惯量 J 、车轮压缩刚度 k_w 、刚臂长度 H 和 L 、初始速度 V ;另一类则较难确定,包括碰撞过程接触区域的压缩刚度 k_x , k_y 和屈服力 F_{px} , F_{py} 。本文采用静力压缩数值实验确定 k_x , k_y , F_{px} , F_{py} 取值,最终确定的简化模型参数取值如表 3 所示。

$$\begin{cases} m\ddot{x} = -F_x(k_x, F_{px}, x - H \sin \theta, dp_x) \\ m\ddot{y} = -F_y(k_y, F_{py}, y + L \sin \theta, dp_y) + F_w(k_w, y) \\ J\ddot{\theta} = F_x(k_x, F_{px}, x - H \sin \theta, dp_x)H \cos \theta - F_y(k_y, F_{py}, y + L \sin \theta, dp_y)L \cos \theta \\ x(0) = 0 \quad y(0) = 0 \quad \theta(0) = 0 \quad \dot{x}(0) = V \quad \dot{y}(0) = 0 \quad \dot{\theta}(0) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$F_x = \begin{cases} 0, & \text{if } : (x - H \sin \theta - dp_x) < 0 \\ k_x(x - H \sin \theta - dp_x), & \text{if } : 0 \leq (x - H \sin \theta - dp_x) \leq F_{px} / k_x \\ F_{px}, & \text{if } : (x - H \sin \theta - dp_x) > F_{px} / k_x \end{cases} \quad (2)$$

$$F_y = \begin{cases} 0, & \text{if } : (y + L \sin \theta - dp_y) < 0 \\ k_y(y + L \sin \theta - dp_y), & \text{if } : 0 \leq (y + L \sin \theta - dp_y) \leq F_{py} / k_y \\ F_{py}, & \text{if } : (y + L \sin \theta - dp_y) > F_{py} / k_y \end{cases} \quad (3)$$

$$F_w = \begin{cases} 0, & \text{if } : y > 0 \\ -k_w y, & \text{if } : y \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

表 3 三种车型简化模型参数

	M	V	k_w	H	L	J	k_x	k_y	F_{px}	F_{py}
	/t	/km/h	/kN/mm	/m	/m	/kN·mm·s ²	/kN/mm	/kN/mm	/kN	/kN
厢式车						1.35×10^5	2.00	4.00	800	700
自卸车	10.0	60	5.00	3.75	4.00	1.37×10^5	4.00	6.00	3000	3000
罐车						1.39×10^5	4.00	5.00	2500	2500

4.3 简化模型计算结果

以最常见的自卸车为例, 图 18, 19 显示 90km/h 速度工况基于简化模型与精细化有限元计算的撞击力时程比较, 可见基于简化模型与精细化有限元计算的撞击力时程具有较好的相似性。表 4 显示自卸车和罐车各速度工况撞击荷载简化计算与精细化有限元计算的差别。

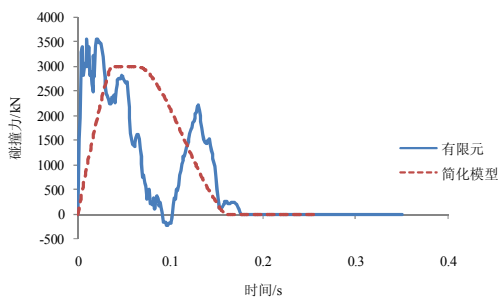


图 18 自卸车水平撞击力简化计算 (V=90km/h)

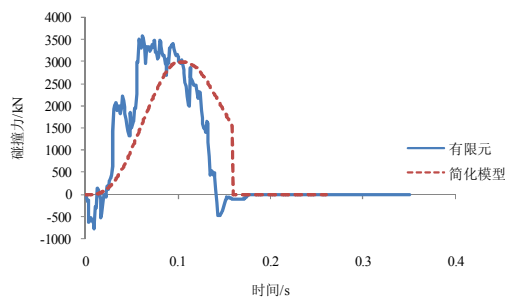


图 19 自卸车竖直撞击力简化计算 (V=90km/h)

对于撞击冲量, 表 4 表明两种方法计算的撞击冲量相对误差在工程允许范围内, 绝大部分误差在 15% 以内, 最大误差为 18.23%。可见对于桥梁上部结构的整体位移响应及其引起的破坏, 可用基于简化模型计算的撞击力时程分析。

表 4 还表明, 对于局部破坏撞击力, 总体说来简化模型计算的荷载偏于安全。考虑到碰撞部位车辆和桥梁的局部构造变异性很大, 且局部动力效应影响明显, 详细分析难度很大, 因此对于碰撞区域局部破坏, 建议用 2 倍的简化模型撞击力时程最大值。这是考虑到局部破坏属于高阶振动破坏, 偏于保守其

动力放大系数可取为 2.0。

表 4 简化计算与精细化有限元计算结果对比

撞击速度 /km/h	撞击荷载	自卸车						罐车					
		X 方向			Y 方向			X 方向			Y 方向		
		精细模型	简化模型	误差 /%	精细模型	简化模型	误差 /%	精细模型	简化模型	误差 /%	精细模型	简化模型	误差 /%
30	I/kN·m	100.5	103.3	2.79	80.4	92.0	14.43	103.7	99.9	-3.66	79.4	82.7	4.16
	F/kN	862.2	1208.5	40.16	773.3	1171.2	51.45	914.3	1206.0	31.90	662.7	1139.9	72.01
60	I/kN·m	184.2	206.8	12.27	172.3	182.5	5.92	189.7	200.2	5.54	146.6	165.0	12.55
	F/kN	1500.2	2417.4	61.14	1671.4	2334.7	39.69	1515.9	2412.3	59.13	1158.3	2270.7	96.04
90	I/kN·m	251.2	297.0	18.23	264.3	271.4	2.69	251.7	279.3	10.97	234.3	263.2	12.33
	F/kN	1821.9	3000.0	64.66	2266.5	3000.0	32.36	1930.1	2500	29.53	1925.9	2500	29.81

5 结论

本文分别基于精细化有限元和简化模型,对不同类型超高车辆撞击桥梁上部结构的荷载进行了计算与比较,得到如下结论:

1) 有限元为精细分析超高车辆撞击桥梁上部结构的荷载提供了有力工具,而本文提出的简化模型可方便计算撞击荷载,与精细化有限元计算结果吻合良好。

2) 不同类型的超高车辆,在总质量和初始速度相同的情况下,撞击荷载存在很大差异,水平荷载以罐车撞击最不利,竖直荷载以自卸车撞击最不利,而厢式车撞击力一般较小。

参考文献

- [1] 王军华,叶晓彦.立交桥试用激光防撞预警系统[N].北京晚报,2007-07-31.
- [2] 张炎圣,陆新征,宁静,江见鲸.超高车辆撞击组合结构桥梁的仿真分析[J].交通与计算机,2007,3(25):65-69.
- [3] 陆新征,张炎圣,宁静,江见鲸,任爱珠.超高车辆与立交桥碰撞的高精度非线性有限元仿真[J].石家庄铁道学院学报,2007,20(1):29-34.
- [4] LU XZ, ZHANG YS, NING J, JIANG JJ, REN AZ. Simulation for the impact between over-high truck and steel-concrete composite bridge[A]. Zhou X.G., Han L.H., Chiew S.P.. Proceedings of the 9th International Conference on Steel Space & Composite Structures[C]. Singapore, CI-premier Conference Organization, 2007:91-698.
- [5] LU XZ, ZHANG YS, NING J, JIANG JJ, REN AZ. Nonlinear finite element simulation for the impact between over-high truck and bridge-superstructure[A]. Prof F L Huang, Dr Q M Li, A/Prof T S Lok. Proceedings of the 7th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures[C]. Singapore, CI-premier Conference Organization, 2007:387-394.
- [6] <http://www.dfclqc.com/>
- [7] 张荣花.厢式车车厢的集装箱化生产[J].集装箱化.2005,11:36-38.
- [8] <http://www.dfclqc.com/carnews/carnews389.html>
- [9] 王海虹,苑玉刚,程平.GF_{18K}型水泥罐车的研制[J].铁道车辆.2006,44(1):14-15.
- [10] 刘中华,程秀生,杨海庆,柴晓磊,刘兴兴.薄壁直梁撞击时的变形即吸能特性[J].吉林大学学报(工学版),2006,36(1):25-30.
- [11] 张俊,朱浮声,武泽锋.刹车时轮胎动态接触压力的三维有限元分析[J].东北大学学报(自然科学版).2007,28(11):1652-1655.
- [12] 赖跃.重型车辆与半刚性护栏碰撞的有限元分析[D].上海,同济大学,2006.
- [13] 魏朗.车辆碰撞事故解析计算中主要影响因素误差界定[J].中国公路学报,2000,13(1):109-113.
- [14] Steel Diaphragms in Prestressed Concrete Girder Bridges[R]. Iowa department of transportation, center for transportation research and education, 2004.

作者信息: 张炎圣 (1984.12-), 男, 硕士, 结构非线性仿真

清华大学土木工程系, 100084

010-62794692, zhangys07@gmail.com

何水涛 (1984.9), 男, 硕士, 结构非线性仿真,

清华大学土木工程系, 100084

010-62794692, hstthu@gmail.com